

論文 再生細骨材の品質と置換率がフライアッシュコンクリートの諸特性に及ぼす影響

山崎勇輔*1・高巢 幸二*2・小山田 英弘*2・陶山 裕樹*3

要旨：本研究では再生細骨材を混合したフライアッシュコンクリートの強度特性や耐久性状への影響を明らかにすることを目的とした。再生細骨材の品質の低下・置換率の増加に伴い、圧縮強度は低下し、乾燥収縮率は増加する傾向を示した。孔径 0.1~2μm の細孔容積と圧縮強度は、いずれの材齢においても双曲線で近似された。孔径 50nm~2μm の細孔容積と乾燥収縮率は材齢 91 日において高い相関を示した。単位クリープひずみに関して、コンクリート中の総水量 (TW) の大きな割合ほどひずみは大きくなると考えられた。予測式に
 関して、再生細骨材を用いたコンクリートにおいては ACI 式により予測ができる可能性が示された。

キーワード：再生細骨材, フライアッシュ, 圧縮強度, 乾燥収縮, クリープ

1. はじめに

現在社会では、持続的発展を可能とする建築・都市・社会の構築の基礎として再生産資源の有効利用と非生産資源の 3R の徹底化による自然のサイクルの再構成が求められている。コンクリート産業で実現可能な 3R として、再生骨材の利用拡大が期待されている。このうち再生骨材 M や L は、高品質な再生骨材 H と比べて、低エネルギーかつ低コストで製造することが可能であり、環境負荷を軽減しつつ経済的に利用し易い再生骨材といえる。しかしながら、再生骨材コンクリート (特に M や L) は、強度低下や乾燥収縮ひずみの増大等、様々な問題を抱えており、その適用範囲は限定されているのが現状である¹⁾。

石炭灰 (フライアッシュ) は石炭火力発電所から大量に排出され、それを処理するための処理場も不足しており、フライアッシュ (以下 FA と記す) の有効利用、再資源化が環境保全の観点からも課題となっている。そこで、低炭素化社会へ貢献する動きの一つとしてセメントの一部をフライアッシュに置換することが注目されている²⁾。FA を混入するとコンクリートの単位水量の低減や水和熱の抑制、流動性の向上、FA のポゾラン反応による乾燥収縮の抑制効果や強度発現性等が認められている。

既往の研究として、再生骨材を使用したフライアッシュコンクリートの圧縮強度性状に関する研究³⁾や凍結融解抵抗性に関する研究⁴⁾などが挙げられる。いずれの研究においても、コンクリートの細孔構造による圧縮強度や乾燥収縮率についての評価はされていない。また、クリープ性状は検討されていないため、再生骨材コンクリートの長期荷重に対する安全率の根拠資料は必ずしも十分とはいえない。

そこで本研究では再生細骨材と FA を混合利用したコンクリートの強度特性や耐久性状への影響を明らかにす

表-1 使用材料

項目	種類	物性	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³	C
水	上水道水	—	W
細骨材	海砂 (北九州市岩屋)	絶乾密度: 2.59g/cm ³ 粗粒率: 2.60 吸水率: 1.04% 実積率: 62.1%	NS
	再生細骨材 M	絶乾密度: 2.22g/cm ³ 粗粒率: 2.80 吸水率: 6.86% 実積率: 67.4% 付着モルタル率: 21.7%	RS
	再生細骨材 L	絶乾密度: 1.97g/cm ³ 粗粒率: 3.54 吸水率: 12.90% 実積率: 68.7% 付着モルタル率: 43.4%	
粗骨材	碎石 (岡垣町上瀬)	絶乾密度: 2.69g/cm ³ 粗粒率: 6.90 最大寸法: 20mm 吸水率: 1.31% 実積率: 56.6%	G
混和材	フライアッシュ (JIS II 種)	強熱減量: 1.3% 密度: 2.30g/cm ³ ブレン値: 4000cm ² /g フロー値比: 111% 活性度指数 材齢28日: 90% 材齢91日: 102%	FA
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	
	AE 減水剤	アルキルエーテル系 陰イオン界面活性剤	

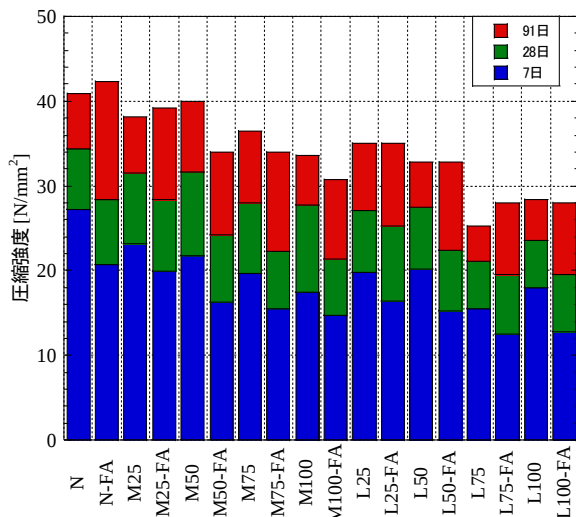
表-2 調合

調合	W/C [%]	W/B [%]	単位質量[kg/m ³]					
			W	C	FA	NS	RS	G
N	55	55	180	262	65	327	0	832
N-FA								0
M25-FA								816
M50-FA								612
M75-FA								186
M100-FA								408
L25-FA								372
L50-FA								204
L75-FA								558
L100-FA								744
	69							0
								612
								174
								408
								348
								204
								522
								0
								696

*1 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 環境工学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 北九州市立大学 国際環境工学部 教授 工博 (正会員)

*3 北九州市立大学 国際環境工学部 准教授 工博 (正会員)



図－1 圧縮強度の経時変化

ることを目的とした。また、再生骨材コンクリートの利用拡大のためには強度・乾燥収縮等の予測が重要であると考えられるため、再生骨材コンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、クリープに関してコンクリート中の総水量、予測式、細孔構造の観点から検討を行った。

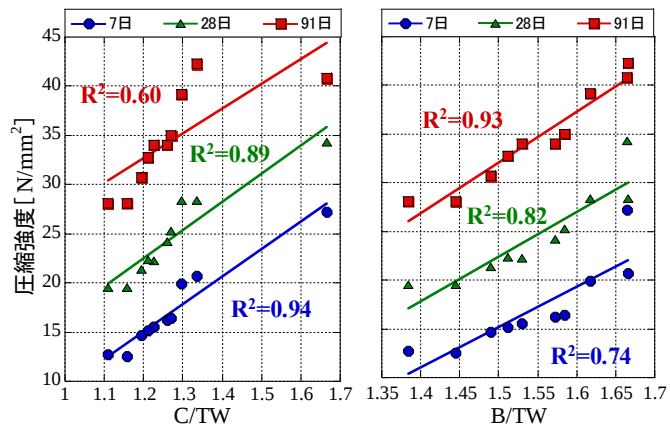
2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

表－1 に本実験にて使用した材料の物性を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材として海砂と再生細骨材 2 種（JIS A 5022 の M 規格、JIS A 5023 の L 規格のもの）、なお、使用した解体材は製造過程上、複数の解体材が混在したものである。粗骨材は砕石を使用した。FA は JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に規定されるⅡ種に適合するものを使用した。表－2 に調合を示す。調合は水粉体比（W/B）を 55%、単位水量を 180kg/m^3 一定とした。FA はセメント代替による内割混合とし、混入率は 20%とした。再生細骨材の置換率は 25, 50, 75, 100%の 4 水準とする計 10 調合で実験を行った。調合記号は使用した再生細骨材の品質、再生細骨材の置換率の順に表記している。例えば、M75-FA とは再生細骨材の M 種を 75%置換し、FA を 20%混入した調合である。

2.2 実験方法

練混ぜは二軸強制練ミキサを使用し、練混ぜ時間は 2.5 分を基準として、必要に応じて混和剤を後添加し目標空気量 $4.5 \pm 1.0\%$ を満足するように練り混ぜた。なお、空気量の変動による圧縮強度の違いを出来るだけ除去するために混和剤の添加量と練混ぜ時間を配（調）合毎に変更した。測定項目は圧縮強度、乾燥収縮率、クリープひずみ、細孔容積とした。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じた。供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）は材齢 1 日で脱型し、目標材齢（7, 28, 91 日）まで 20°C の水中で養生した。乾燥



図－2 C/TW と圧縮強度

図－3 B/TW と圧縮強度

収縮試験は JIS A 1129-2 の「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準じた。供試体は材齢 1 日で脱型し、 20°C の水中で 2 日間養生した。その後材齢 3 日で水中から取り出し、ステンレス製チップ（ $10 \times 10\text{mm}$ ）を供試体両端面に張り付けた後、両端面をシールし再び水中で 4 日間養生し、材齢 7 日を乾燥期間 0 日として測定した。圧縮クリープ試験は、JIS A 1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準じた。載荷装置には分離式油圧ジャッキを使用し、測定はひずみゲージを貼り付けデータロガーで行った。細孔容積測定は目標材齢（7, 28, 91 日）まで水中養生した供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を破碎し、ふるいをを用い $2.5 \sim 5.0\text{mm}$ の粒群とし、その後アセトン浸漬により水和反応を停止させ、72 時間真空乾燥させたものを試料とした。測定は水銀圧入式ポロシメーターにより行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

3.1.1 圧縮強度の経時変化

図－1 に圧縮強度試験の結果を示す。なお、図中には FA 無混合（M25, M50, M75, M100, L25, L50, L75, L100）の高巣ら⁵⁾の研究の試験結果も記している。全ての調合において材齢の経過とともに圧縮強度は増進した。また、混合した再生細骨材の品質の低下及び置換率の増加に伴い、圧縮強度は低下する傾向を示した。FA を混合した本実験の調合においては、材齢 28 日まではセメント量の減少により圧縮強度は低い値を示したが、材齢 91 日では FA 無混合の調合と同等もしくはそれ以上の値を示した。これは、FA のポゾラン反応⁶⁾により細孔組織の緻密化が起き、圧縮強度の増進に至ったと考えられる。また、材齢 91 日において L50-FA と M75-FA が概ね等しい値を示していることから FA を内割混合した場合には、再生細骨材 L を 50%置換したコンクリートと再生細骨材 M を 75%置換したコンクリートは同等の圧縮強度を示すものと考えられる。

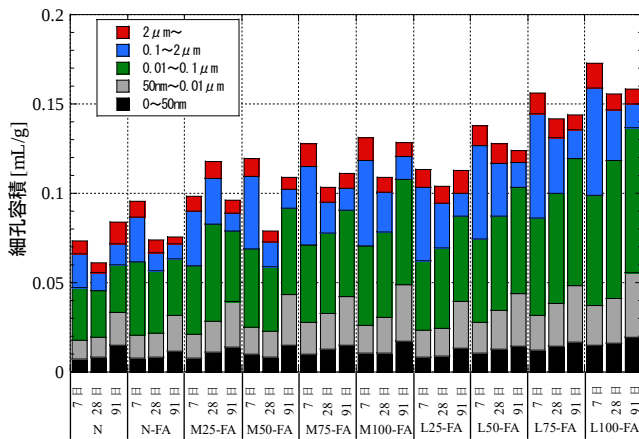


図-4 細孔容積の経時変化

麓ら⁷⁾の研究によると、再生骨材を用いた再生骨材コンクリートにおいて圧縮強度及び耐久性は、単位セメント量 (C) と骨材の全含水量を考慮したコンクリート中の総水量 (TW) の比である C/TW と相関が高いことを明らかにしている。ここで、TW は単位骨材体積と骨材含水率および骨材絶対乾密度の積による骨材中の水量と単位水量の和によって求めている。図-2 に C/TW と圧縮強度の関係を示す。各材齢において、再生細骨材の品質・置換率に関わらず、C/TW の増加とともに圧縮強度も増加する傾向を示し、両者には相関関係があった。松下ら⁸⁾の研究によると、再生骨材を使用したコンクリートの強度低下の原因として、セメントペースト部の細孔構造の粗大化が影響していると考えられている。よって、本実験においても再生細骨材中の水分がセメントペースト部に滲出し、ペースト部の W/C が増加したと考えられる。また、材齢の経過により決定係数 (R^2) が小さくなることが確認された。これは FA を混入したことによる強度増進が影響していることが原因と考えられる。また、本実験では FA を使用しており、C/TW のみでは適切に評価することが出来ないと考えたため、結合材総水量比 (B/TW) についても評価を行った。図-3 に B/TW と圧縮強度の関係を示す。C/TW の場合と比較して、材齢 7、28 日において決定係数は低い値を示したが、材齢 91 日において決定係数は高い値を示した。したがって、再生骨材と FA を混合したコンクリートにおいて、材齢 28 日以前は C/TW による評価が有効であるが、材齢 28 日以降は B/TW による評価が望ましいと言える。

3.1.2 細孔容積と圧縮強度の関係

図-4 に細孔容積の経時変化を示す。材齢 7 日において、混合した再生細骨材の品質の低下及び置換率の増加に伴い、細孔容積は増加する傾向を示した。また、いずれの調査においても孔径 0.01~0.1 μm および 0.1~2 μm の細孔容積が多いことが分かる。材齢 91 日においては、材齢 7 日と比較すると、孔径 0.1~2 μm の細孔容積は減少し、孔径 0~0.01 μm および 0.01~0.1 μm の細孔容積が増

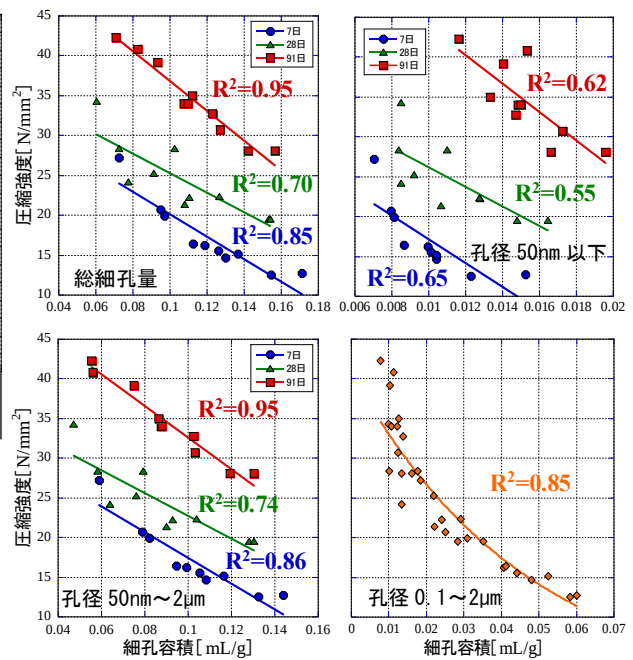


図-5 細孔容積と圧縮強度の関係

加していることが分かる。山本ら⁹⁾の研究では FA のポズラン反応に伴い、孔径 0.1 μm より大きい細孔量は減少し、孔径 0.1 μm 以下の細孔量は増加するといわれている。したがって、再生細骨材を用いたフライアッシュコンクリートの場合においても細骨材の品質・置換率に関わらず同様の現象が生じたものと推察され、FA を混入した場合の 28 日以降の強度が増加したのは FA のポズラン反応によるものであると裏付けられる。

図-5 に総細孔量、孔径 50 nm 以下、孔径 50 nm~2 μm、孔径 0.1~2 μm の細孔容積と圧縮強度の関係を示す。孔径 50 nm~2 μm の細孔容積は細孔径分布において最も強度に支配的であるとされる遷移帯の空隙量に相当する¹⁰⁾とされており、本実験では特に孔径 0.1~2 μm との対応が良かった。さらに、双曲線で近似できたことから、孔径 0.1~2 μm の細孔容積はいずれの材齢の圧縮強度においても相関があると言える。

3.2 乾燥収縮

3.2.1 乾燥収縮率の経時変化

図-6 に乾燥収縮率の経時変化を示す。再生細骨材 M および L ともに、再生細骨材の置換率の増加にともない、乾燥収縮率も増加する傾向を示し、再生細骨材 L では普通コンクリートと比べ、その差が顕著にみられた。乾燥収縮は単位水量が多いほど大きくなるといわれており、本実験の単位水量を単位総水量として捉えたときに再生細骨材の品質の低下・置換率の増加に伴い単位総水量は増加することから、本実験においては骨材の吸水率が乾燥収縮に影響を与えていると考えられる。置換率 25%、50% に大きな差はないが、置換率 50% を超えると乾燥収縮率が大きく増加する傾向が確認された。さら

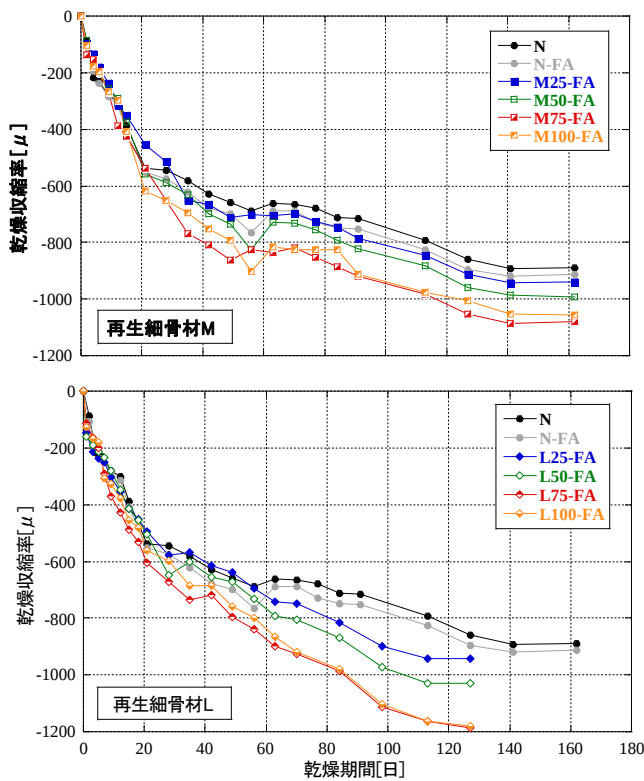


図-6 乾燥収縮率の経時変化

に、乾燥期間の経過に伴い、乾燥収縮率の差が調合ごとに顕著になった。

また、乾燥収縮はコンクリート中の水量に大きく影響される事が知られており、前述の C/TW および B/TW で評価できると考えた。図-7 に C/TW と乾燥収縮率の関係を示す。乾燥期間7日においては調合ごとの乾燥収縮率に差が見られないため両者に相関はないが、乾燥期間の経過とともに C/TW が小さくなるほど乾燥収縮率が増加する傾向を示し、相応の相関が確認された。図-8 に B/TW と乾燥収縮率の関係を示す。 C/TW の場合と比較して、いずれの乾燥期間においても決定係数は高い値を示した。したがって、FA をセメント内割で 20%混合したコンクリートにおける乾燥収縮率は C/TW ではなく B/TW により、適切に評価ができると考えられる。また、材齢 28 日以降でポズラン反応が発現されており B/TW と材齢 91 日の乾燥収縮率の関係が良好になった。

3.2.2 細孔容積と乾燥収縮率の関係

図-9 に細孔容積と乾燥収縮率の関係を示す。総細孔量、孔径 $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ に関して、材齢 7、28 日においては両者に相関はないが、材齢 91 日において良好な相関関係が確認された。したがって、乾燥収縮率においても圧縮強度と同様に、孔径 $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の範囲の細孔容積がコンクリートの乾燥収縮に与える影響が大きいと考えられる。孔径 $0.1\mu\text{m}$ 以下に関しては、決定係数 0.62 とそれほど高くはないが材齢の区別無く評価できる可能性が示された。

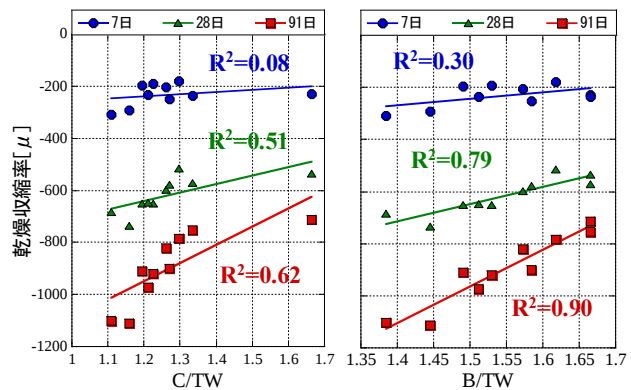


図-7 C/TW と乾燥収縮率 図-8 B/TW と乾燥収縮率

3.2.3 既往の予測式による乾燥収縮率の検討

日本建築学会の AIJ 式、土木学会の JSCE 式、国外で提案されている ACI209 R-92 式、CEB-FIP 式の計 4 つの予測式と本実験での乾燥収縮率の実測値との対応について検討した¹¹⁾。AIJ 式及び JSCE 式においては、予測式における単位水量を TW とした場合の予測値についても検討した。

紙面の都合上、予測値を示すことができないが、概ね全ての調査において、予測値は実測値よりも低い値を示し、AIJ 式による予測値は JSCE 式によるものと比較して大きな値を示す傾向にあった。これは AIJ 式が骨材種類の係数を導入しているためと考えられるが、再生細骨材の方が再生粗骨材より乾燥収縮に与える影響が強くなる傾向¹²⁾があるため AIJ 式も実測値より小さな予測値を示したと考えられる。図-10 に $L50\text{-FA}$ の乾燥収縮率の実測値及び予測値の経時変化、表-3 に乾燥収縮率の実測値と予測値の RMSE 値を示す。なお、表の () 内の数値は、単位水量を TW としたときの RMSE 値を指す。RMSE 値とは回帰モデルの誤差を評価する指標であり、値が小さいほど当てはまりが良いモデルである。RMSE 値より、本実験においては TW で予測した AIJ 式の適合性が最も良い結果となった。したがって、乾燥収縮率の予測式においても TW の導入は有効である。また、ACI 式、CEB-FIP 式においては実測値から大きく乖離したため、国内外の使用材料による影響も関係していると推察される。次に、実測値と予測値の RMSE 値が最小となるように調合ごとに補正係数を検討した。表-4 に各調合の補正係数を示す。AIJ 式においては、再生細骨材 M の場合はおよそ 1.25、再生細骨材 L の場合はおよそ 1.34 となった。JSCE 式においては、再生細骨材 M の場合はおよそ 1.46、再生細骨材 L の場合はおよそ 1.55 となった。また、再生細骨材の品質の低下及び置換率の増加に伴い、補正係数も大きくなる傾向があった。したがって、乾燥収縮率の予測式において使用する細骨材に関する係数を設けることで、予測値の適合性の向上が見込める。

3.3 クリープ性状

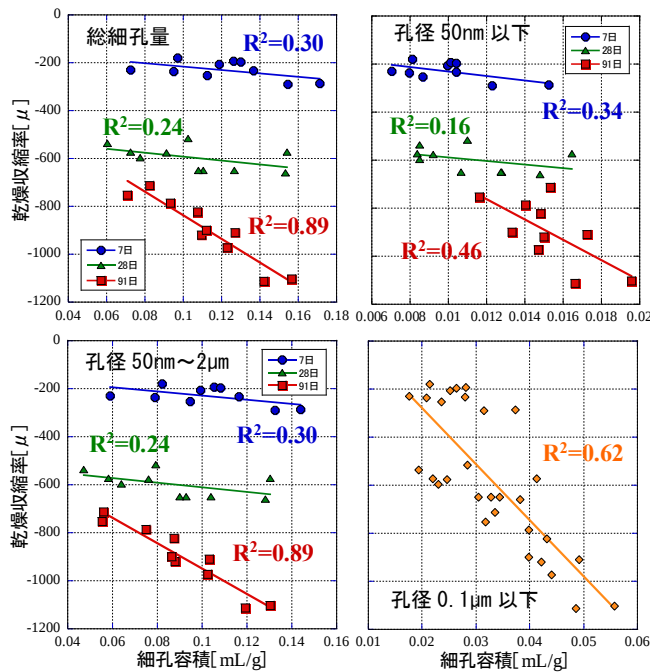


図-9 細孔容積と乾燥収縮率の関係

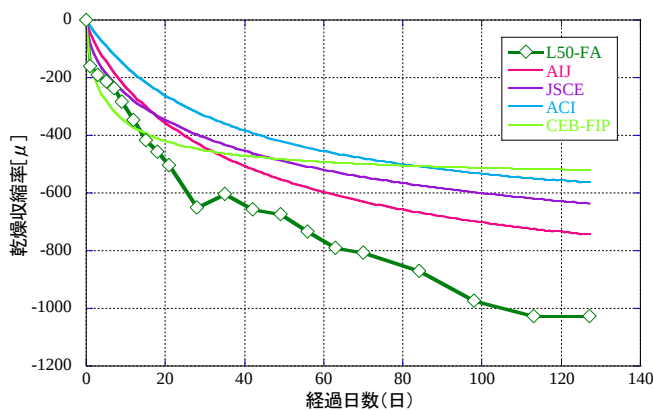


図-10 L50-FA の予測値

3.3.1 単位クリープひずみ

図-11に単位クリープひずみの経時変化を示す。なお、単位クリープひずみはクリープひずみを載荷荷重で除した値を指す。再生細骨材 M を使用した調査は海砂を使用した調査と比較して大きな値を示した。クリープ発生機構として、セメントペースト中の水分が細孔に移動することにより変形は生じる¹³⁾とされており、TW が大きな調査ほど変形したと推察される。また、N と N-FA が同等の値を示していることから本実験の範囲内では単位クリープひずみにおいても FA による影響は少ないものと考えられる。

3.3.2 既往の予測式による単位クリープひずみの検討

日本建築学会の AIJ 式、土木学会の JSCE 式、国外で提案されている ACI 209 R-92 式、CEB-FIP 式の計 4 つの予測式と本実験での単位クリープひずみの実測値との対応について検討した。JSCE 式においては、予測式における単位水量を TW とした場合の予測値も検討した。

表-3 乾燥収縮率の実測値と予測値の RMSE 値

	AIJ式 (TW)	JSCE式 (TW)	ACI式	CEB-FIP式
N	141.31 (84.80)	138.05 (120.07)	215.13	246.73
N-FA	194.54 (140.54)	168.65 (150.53)	216.75	240.56
M25-FA	145.19 (66.27)	165.42 (141.83)	260.94	243.78
M50-FA	140.78 (48.41)	200.39 (170.76)	249.97	251.86
M75-FA	170.94 (48.51)	272.53 (236.56)	322.47	308.97
M100-FA	115.64 (101.26)	255.85 (214.73)	304.58	288.35
L25-FA	158.14 (76.72)	164.64 (138.78)	231.26	199.27
L50-FA	155.55 (45.86)	201.73 (167.57)	264.99	223.89
L75-FA	201.67 (40.17)	285.64 (242.19)	348.40	286.87
L100-FA	143.35 (112.44)	264.34 (213.68)	363.36	271.19

表-4 乾燥収縮率の補正係数

	AIJ式 (TW)	JSCE式 (TW)	ACI式
N	1.30 (1.15)	1.30 (1.20)	1.55
N-FA	1.45 (1.30)	1.35 (1.30)	1.50
M25-FA	1.30 (1.10)	1.30 (1.30)	1.75
M50-FA	1.25 (1.05)	1.45 (1.35)	1.60
M75-FA	1.30 (1.05)	1.60 (1.45)	1.80
M100-FA	1.15 (0.90)	1.50 (1.40)	1.75
L25-FA	1.35 (1.15)	1.40 (1.30)	1.65
L50-FA	1.35 (1.05)	1.50 (1.35)	1.75
L75-FA	1.40 (1.05)	1.70 (1.55)	2.00
L100-FA	1.25 (0.85)	1.60 (1.40)	2.20

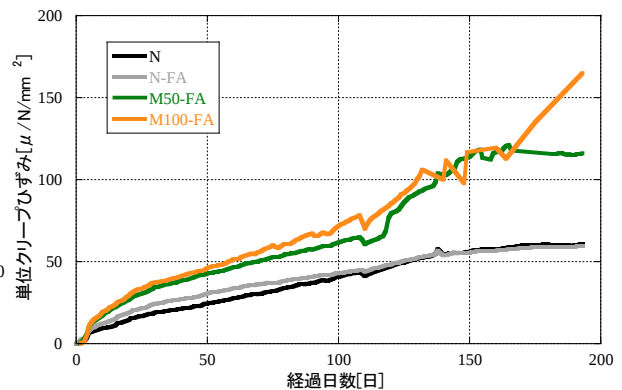


図-11 単位クリープひずみ

図-12に M50-FA の単位クリープひずみの実測値及び予測値の経時変化、表-5 に単位クリープひずみの実測値と予測値の RMSE 値を示す。なお、表の () 内の数値は、JSCE 式における単位水量を TW としたときの RMSE 値を指す。RMSE 値より、N、N-FA においては JSCE 式との適合性が最も良く、M50-FA においては ACI 式、M100-FA においては AIJ 式との適合性が最も良い結果となった。したがって、海砂を用いたコンクリートの単位クリープひずみにおいては JSCE 式により予測ができ、再生細骨材を用いたコンクリートの単位クリープひずみにおいては ACI 式、AIJ 式により予測ができる可能性が示された。本実験では予測式に関して乾燥収縮率とクリープで予測精度が高い式が異なる結果となったが、その明確な理由は本実験の範囲内では明らかにすることができなかった。JSCE 式は他の予測式と比較して、無載荷ひ

表－5 単位クリープひずみの実測値と予測値のRMSE 値

	AIJ式	JSCE式 (TW)	ACI式	CEB-FIP式
N	37.68	14.78(13.67)	13.68	35.03
N-FA	61.90	11.50(10.20)	19.40	56.23
M50-FA	37.35	41.03(38.51)	22.55	39.34
M100-FA	180.00	213.76(211.00)	249.50	671.25

ずみの区別や調合の要因を多く検討していることから、実測値との適合性が高いと考えられる。また、TW の導入は単位クリープひずみの予測式においても有効であった。

4. まとめ

再生細骨材の品質の低下・置換率の増加に伴い、圧縮強度は低下する傾向を示した。材齢 28 日以前は C/TW、材齢 28 日以降は B/TW と圧縮強度に相関関係が確認された。また、総細孔量、孔径 0.1～2 μ m の細孔容積と圧縮強度は、いずれの材齢においても双曲線で近似される。

再生細骨材の品質の低下・置換率の増加に伴い、乾燥収縮率は増加する傾向を示した。置換率 25、50%に大きな差はないが、置換率 50%を超えると乾燥収縮率が大きく増加する傾向が確認された。乾燥期間の経過に伴い、乾燥収縮率の差が調合ごとに顕著になることで B/TW による乾燥収縮率の評価が有効になると考えられる。また、総細孔量、孔径 50nm～2 μ m の細孔容積と乾燥収縮率の関係は乾燥期間 91 日において高い相関を示した。乾燥収縮率の予測式に関して、AIJ 式の方が JSCE 式と比較して実測値との適合性が高く、TW の導入は乾燥収縮率の予測式においても有効であった。さらに、再生細骨材の品質の低下・置換率の増加に伴い、補正係数も大きくなる傾向があった。

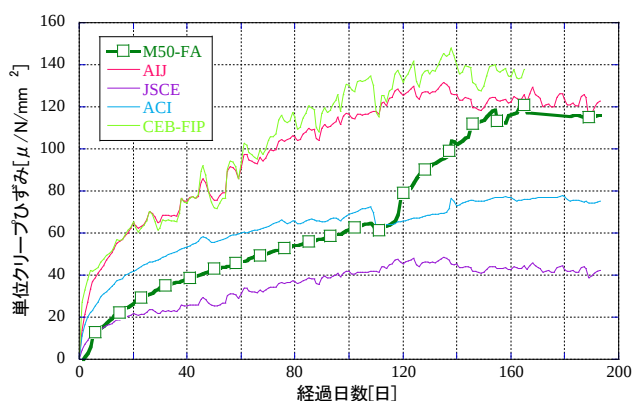
単位クリープひずみに関して、TW の大きな調合ほどひずみは大きくなると考えられる。予測式に関して、海砂を用いたコンクリートにおいては JSCE 式により予測ができ、再生細骨材を用いたコンクリートにおいては ACI 式により予測ができる可能性が示された。

謝辞

本研究は、2020～2022 年度研究費補助金基盤研究 (B) 「再生材料を複合混合した省力施工型低炭素コンクリートの材料設計手法の確立」(課題番号: 20H02300) の支援を受けて行った。また、実験に際して本学 EA・三倉英史氏、同・大坂間望氏、修論生・林俊介君 (現・(株) 谷川建設) から協力を得た。末尾に記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 松田信広 他：低品質再生骨材の CO₂ 吸着による改質が再生骨材コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1417-1422，2015



図－12 M50-FA の予測値

- 2) 土木学会：循環型社会に適したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，コンクリートライブラリー，pp.132，2009.12
- 3) 高巣幸二 他：再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.379-384，2007
- 4) 青江匡剛 他：ハイボリュームフライアッシュ再生骨材コンクリートの効果性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.145-150，2015
- 5) 高巣幸二 他：品質の異なる再生骨材を使用したコンクリートの諸特性に関する研究：その 5 天然細骨材と再生細骨材の混合割合の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.407-408，2016
- 6) 全洪珠 他：コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 602 号，pp.11-16，2006.4
- 7) 麓隆行 他：再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.61-73，2004.8
- 8) 松下博通 他：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.230-242，2006.2
- 9) 山本武志 他：フライアッシュのポズラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察，土木学会論文集 E，Vol.63，No.1，pp.52-65，2007.1
- 10) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性の関係に関する研究，慶応大学学位論文，pp.150，1992
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説，pp.184
- 12) http://data.jci-net.or.jp/data_html/38/038-01-1296.html
- 13) 清水昭之：コンクリートの引張クリープ，コンクリート工学，VOL.21，No.6，pp.4-13，1983.6